中国生态农业学报 2017 年 7 月 第 25 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2017, 25(7): 1016−1024

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160986

单晶晶, 陈小兵, 尹春艳, 文佩, 颜坤, 张立华, 张立宾, 付希强, 孙海栓. 黄河三角洲盐碱土冬小麦氮磷肥料效应模型研究[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(7): 1016−1024

Shan J J, Chen X B, Yin C Y, Wen P, Yan K, Zhang L H, Zhang L B, Fu X Q, Sun H S. Comparison of fertilizer-effect models on winter wheat response to nitrogen and phosphorus fertilizers in saline soils in the Yellow River Delta[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(7): 1016−1024

黄河三角洲盐碱土冬小麦氮磷肥料效应模型研究*

单晶晶[1,2], 陈小兵[1**], 尹春艳[1,2], 文 佩[1,2], 颜 坤[1], 张立华[1],
张立宾[3], 付希强[4], 孙海栓[4]

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所/中国科学院海岸带环境过程与生态修复重点实验室 烟台 264003; 2. 中国科学院大学 北京 100049; 3. 东营市科技情报研究所 东营 257091; 4. 山东省汇邦渤海农业开发有限公司 东营 257091)

摘 要: 通过大田试验, 研究了黄河三角洲盐碱土地区冬小麦合适的肥料效应模型。在冬小麦生长季设置 4 种不同的氮磷肥用量, 根据“3414”试验设计 8 种不同的肥效试验处理, 以探讨线性加平台、一元二次、平方根和二元二次 4 种不同模型的拟合效果。结果显示, 4 种肥料效应模型的拟合结果经检验都达到极显著水平($P<0.01$)。在一元肥料效应模型中, 氮磷一元二次模型拟合效果最好, 最高收益分别为 7 448.3 元·hm^{-2} 和 7 357.7 元·hm^{-2}, 最佳经济氮磷用量分别为 254.4 kg·hm^{-2} 和 98.6 kg·hm^{-2}。对比一元与二元模型, 后者拟合效果较好, 最佳经济氮磷用量分别为 244.1 kg·hm^{-2} 和 94.2 kg·hm^{-2}, 即氮磷肥配比为 2.6∶1, 经济效益为 7 432.4 元·hm^{-2}, 氮肥农学利用率为 6.2 kg(籽粒)·kg^{-1}(N), 磷肥农学利用率为 13.8 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5)。结合拟合度、最佳经济施肥量、经济收益、肥料农学利用率和一元模型的局限性分析得出, 二元二次肥料效应模型最优, 可作为黄河三角洲地区盐碱土冬小麦氮磷肥效模型的最佳选择。

关键词: 肥料效应模型; 氮磷肥; 最佳经济施肥量; 冬小麦; 盐碱土; 黄河三角洲
中图分类号: S147.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2017)07-1016-09

Comparison of fertilizer-effect models on winter wheat response to nitrogen and phosphorus fertilizers in saline soils in the Yellow River Delta*

SHAN Jingjing[1,2], CHEN Xiaobing[1**], YIN Chunyan[1,2], WEN Pei[1,2], YAN Kun[1],
ZHANG Lihua[1], ZHANG Libin[3], FU Xiqiang[4], SUN Haishuan[4]

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes and Ecological Remediation / Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Dongying Institute of Scientific and Technical Information, Dongying 257091, China; 4. Shandong Huibangbohai Agricultural Development Co. Ltd., Dongying 257091, China)

Abstract: Salt-affected soils distribute widely across the Yellow River Delta, which inhibit plant growth and crop yield in this

* 国家重点研发计划课题(2016YFD0200303)、山东省重点研发计划(2016CYJS05A01-1)、东营市重点研发计划项目(2016YF17)和中国科学院海岸研究所部署项目(Y254021031)资助
** 通讯作者: 陈小兵, 研究方向为水土资源管理及环境影响评价。E-mail: xbchen@yic.ac.cn
单晶晶, 主要从事土壤盐渍化与改良技术方面的研究。E-mail: sjj19891222@163.com
收稿日期: 2016-11-04 接受日期: 2017-02-24

* This study was supported by the National Key R&D Projects of China (2016YFD0200303), Shandong Key R&D Project (2016CYJS05A01-1), Dongying Key R&D Project (2016YF17), and the Project of Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences (Y254021031).
** Correspondence author, E-mail: xbchen@yic.ac.cn
Received Nov. 4, 2016; accepted Feb. 24, 2017

area. Although fertilizer application can alleviate the adverse impact of salinization on crop, little remains known about the performance of different fertilizer-effect models on simulation of '3414' fertilizer experiments in winter wheat field in saline soils. Among the essential elements, nitrogen (N) and phosphorus (P) are usually the most important nutrients limiting plant growth in saline or non-saline soils. In this study, four fertilizer-effect models were used to simulate the impact of N and P fertilizers on wheat yield in a field experiment in Lijin County of Shandong Province. The study aimed at selecting suitable fertilizer-effect model for wheat grown in saline soils in the Yellow River Delta. Four levels of N and P fertilizers (N: 0 kg·hm^{-2}, 135 kg·hm^{-2}, 170 kg·hm^{-2}, 405 kg·hm^{-2}; P: 0 kg·hm^{-2}, 53 kg·hm^{-2}, 105 kg·hm^{-2}, 157.5 kg·hm^{-2}) were set in eight treatments based on the '3414' test in order to investigate the fit effect of the four fertilizer-effect models — linear plus plateau, unary quadratic, square root and binary quadratic. To ensure the accuracy of fertilizer-effect models, the least square method was used in the statistical regression analysis. The results suggested that the four fertilizer-effect models had an extremely significant level ($P < 0.01$) based on the fit test. Unary quadratic model of effects of N and P fertilizers was the best among unary fertilizer-effect models, which suggested that the highest income levels were 7 448.3 ¥·hm^{-2} and 7 357.7 ¥·hm^{-2} and the recommended N and P rates were 254.4 kg·hm^{-2} and 98.6 kg·hm^{-2}, respectively. Compared with the unary models, binary model was better. In binary model, the best N and P application amounts were respectively 244.1 kg·hm^{-2} and 94.2 kg·hm^{-2}, with N to P ratio of 2.6. In the model, the economic benefit and agronomic efficiency of N and P were 7 432.4 ¥·hm^{-2}, 6.2 kg(grain)·kg^{-1}(N) and 13.8 kg(grain)·kg^{-1}(P_2O_5), respectively. On the basis of the fitted curve, the binary quadratic model had the better economic fertilizer rate, agronomic efficiency, economic benefits than the unary models. Then the binary quadratic fertilization model was the best for wheat cultivation in saline soils in Yellow River Delta.

Keywords: Fertilizer-effect model; Nitrogen and phosphorus fertilizers; Optimal economic fertilizer rate; Winter wheat; Saline soil; Yellow River Delta

据联合国教科组织(UNESCO)和粮农组织(FAO)不完全统计, 全世界盐渍土面积达 9.5 亿 hm^2[1], 如何将这些潜在土地开发改良为耕地是一个世界性难题。我国黄河三角洲地区盐碱土分布广泛[2], 其中东营市拥有近 53 万 hm^2[3], 受人为及自然环境的影响, 该地区盐渍化日趋严重[4]。含盐量低于 0.2%的土壤占黄河三角洲面积的 4.29%[2], 盐分含量在 0.1%~0.3%的轻度盐渍土易被开垦利用[5], 科学开发与利用这些土地是"黄河三角洲高效生态经济区"建设的重要内容。

土壤养分和盐分状况决定了盐碱地的植被类型和土地利用方式[6], 因此, 深耕、增施绿肥等土壤管理措施常作为改良盐碱土的手段[7-8]。有机无机配施、氮磷钾配施等都可在一定程度上减缓盐分对作物的胁迫作用, 促进其生长[9-11]。合理科学施肥不仅可以优化肥料施用量, 还可以提高肥料利用率, 以保护农业生态环境[12-15]。黄河三角洲地区肥料用量相当大, 东营市2013年消耗氮肥16万t、磷肥9万t、钾肥2万t、复合肥10万t(以上为化肥实物量)[16]。过量施肥不仅造成肥料浪费和水体富营养化, 还导致土壤盐渍化[17]。我国肥料利用率偏低, 氮磷钾肥的利用率分别为30%~35%、10%~25%和35%~50%[18], 而盐碱土受盐胁迫的影响其肥料利用率更低[19]。如何使盐碱地肥料达到高效利用是长期以来需要解决的问题。

目前, 盐碱土施肥的研究大多针对土壤和作物作用机理方面, 而针对肥料效应数学模型角度的研究较少。肥料效应模型(经验模型)是根据田间试验结果, 建立在生物统计基础上的回归模型, 描述了施肥量和作物产量间的数量关系。通过建立肥料效应模型可以确定合理施肥量, 该方法也是国内外实现定量化施肥的主要途径[20-21]。在肥效试验中(尤其是"3414"肥效试验)大部分采用三元二次肥料效应模型进行模拟[22], 但成功率不高[23], 易舍弃, 造成数据流失; 在不考虑试验区实际情况下, 如北方地区部分土壤不缺钾, 选用三元二次模型会得出缺钾的错误结论[24], 并且三元二次模型即使拟合成功也需要一元和二元模型进行补充, 因此, 合适肥料效应模型的选择非常重要。王素华等[25]在冬小麦(*Triticum aestivum*)"3414"试验中未能用氮磷钾三元二次肥料效应模型成功拟合, 而采用了一元一次和二次模型拟合。王新民等[26]在探究冬小麦产量和氮肥用量关系时发现, 第 1 年肥料效应模型适合选择线性加平台模型, 而第 2 年则更适合选择二次多项式模型, 即在同一地点随着环境条件的改变, 肥料效应模型的选择也随之改变。因此, 模型的选择需要根据试验区环境条件确定; 大量研究表明, 肥料模型的选择因作物和养分而异[21]。虽然前人关于肥料效应模型的研究较多, 但鲜有涉及盐碱土条件下的模型研究。本试验利用黄河三角洲地区的盐碱土, 通过布

置“3414”试验探究该地区冬小麦的肥料效应模型，找出最佳施肥量，以期为该地区的冬小麦合理化施肥提供依据。冬小麦是黄河三角洲主要的粮食作物[16]，建立该地区盐碱土冬小麦的肥料效应模型便于指导科学施肥。通过模型计算出最佳施肥量用以推荐施肥，不仅可以实现施肥定量化，也为将来土壤养分管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2015 年 10 月在山东省东营市利津县汀罗镇渤海农场(37°41′17.25″N，118°36′03.76″E)进行，该农场海拔 6 m 左右，属北温带季风气候区。年降水量 542 mm，且季节分配不均，6—8 月降水量占全年的 63.9%，形成了春旱、夏涝、晚秋又旱的气候特点；年平均气温 12.3 ℃，≥10 ℃积温 4 183 ℃，无霜期 203 d，全年日照时数 2 712.9 h[3]；平均地下水埋深 1.34 m，矿化度 15 g·L^{-1}。试验区土壤为砂壤土，其颗粒分布为砂粒 67%、粉粒 27%、黏粒 6%；土壤 $pH_{1:5}$ 为 8.59，容重 1.3 g·cm^{-3}；土壤有机质 10.35 g·kg^{-1}、全氮 0.958 g·kg^{-1}、有效磷 17.8 mg·kg^{-1}、速效钾 66.8 mg·kg^{-1}；表层土壤(0~20 cm)全盐 1.4 g·kg^{-1}、Na^+ 357 mg·kg^{-1}、Cl^- 533 mg·kg^{-1}，属于轻度盐化土。

1.2 试验设计

试验取“3414”部分方案进行实施，即布置氮、磷两因素试验，氮和磷各分为 0、1、2、3 共 4 个水平，其中：0 水平指不施肥，2 水平指当地最佳施肥量的推荐值，1 水平=2 水平×0.5，3 水平=2 水平×1.5(该水平为过量施肥)，具体施肥量见表 1。试设 8 个处理，每个处理重复 4 次，共 32 个小区，各小区完全随机排列，面积为 21 m^2(3 m×7 m)。冬小麦于 2015 年 10 月 22 日播种，行距 16 cm，播种量 225 kg·hm^{-2}。氮肥基肥和追肥比例为 6∶4，磷肥全做基肥。供试冬小麦品种为‘山农 24 号’，氮肥为尿素(46% N)，磷肥为过磷酸钙(15% P_2O_5)。

在冬小麦越冬期、拔节期和灌浆期各进行一次灌溉，其他管理措施同大田。于 2016 年 6 月 14 日收获，成熟期全部小区测实产。

1.3 肥料效应模型

1.3.1 一元肥料效应模型

①线性加平台(linear plus plateau)模型：

$$\begin{cases} y = a + bx & (x \leqslant C) \\ y = P & (x > C) \end{cases} \tag{1}$$

表 1 各施肥处理的氮肥和磷肥施用量

Table 1 Nitrogen and phosphorus fertilization rates of different treatments

处理编号 Treatment	处理水平 Treatment level		施肥量 Fertilizer rate (kg·hm^{-2})	
	氮肥 Nitrogen fertilizer	磷肥 Phosphorus fertilizer	N	P_2O_5
1	0	0	0	0
2	0	2	0	105
3	1	2	135	105
4	2	0	270	0
5	2	1	270	53
6	2	2	270	105
7	2	3	270	158
8	3	2	405	105

式中：y 为籽粒产量(kg·hm^{-2})；x 为肥料施用量(kg·hm^{-2})；a 为截距，即不施肥的产量水平；b 为回归系数；C 为直线与平台的交点；P 为施肥量达到 C 值时的产量，即平台产量(kg·hm^{-2})。

②一元二次(unary quadratic)模型：

$$y = a + bx + cx^2 \tag{2}$$

式中：b 为一次项回归系数，c 为二次项回归系数，y、x、a 意义同上。

③平方根(square root)模型：

$$y = a + bx^{0.5} + cx \tag{3}$$

式中：b 为平方根项回归系数，c 为一次项回归系数，y、x、a 意义同上。

1.3.2 二元肥料效应模型

二元二次(binary quadratic)模型：

$$y = ax_1^2 + bx_2^2 + cx_1x_2 + dx_1 + ex_2 + f \tag{4}$$

式中：y 为籽粒产量(kg·hm^{-2})；x_1、x_2 分别为氮肥和磷肥施用量(kg·hm^{-2})；f 为截距，即不施肥的产量水平；a、b、c 为二次项回归系数；d、e 为一次项回归系数。

1.4 最佳施肥量计算

一元二次、平方根和二元二次肥料效应模型通过边际效应的方法确定每个小区的最佳氮、磷施肥量，线性加平台模型则直接计算最佳施肥量。边际效应是根据边际收益等于边际成本的原则计算经济最佳施肥量，即 $d_y \cdot p_y = d_x \cdot p_x$ (p_x 和 p_y 分别为肥料和冬小麦价格)。本试验冬小麦采用 2016 年山东省东营市冬小麦收购价格 1.27 元·kg^{-1}；肥料采用市场实际购买价格，即尿素 1.6 元·kg^{-1}，过磷酸钙 2.4 元·kg^{-1}。

1.5 数据处理

运用 Microsoft Excel 和 SAS 统计软件，利用最小二乘法原理[27]对试验数据进行回归统计分析，利

用 ORIGIN 和 MATLAB 软件进行作图。

2　结果与分析

2.1　一元和二元肥料效应模型

在回归分析过程用每个重复的试验数据取代各重复的平均数进行统计，以避免将重复试验变成无重复试验，虽然两种统计方法得到的回归方程相同，但后者的统计检验结论会被错误夸大[28]。用处理 2、3、6、8 拟合 105 kg·hm^{-2} 施磷量的氮肥效应模型，用处理 4、5、6、7 拟合 270 kg·hm^{-2} 施氮量的磷肥效应模型。具体肥料效应方程见表 2。

由表 2 可知，氮磷肥料的一元肥料效应方程 R^2 值为线性加平台模型>一元二次模型>平方根模型>0.5，且经 F 检验 P 值均小于 0.01，故冬小麦籽粒产量与氮磷用量呈极显著相关，即该模型能较好地反映施肥量和产量间的关系。对比氮磷两种肥料效应方程，后者 R^2 大于前者，表现出磷肥的拟合效果优于氮肥。

表 2　盐碱地冬小麦氮磷肥一元肥料效应方程

Table 2　Unary models of nitrogen and phosphorus fertilizers effects on winter wheat yield in saline soil

肥料 Fertilizer	肥料效应方程 Fertilizer effect model		决定系数 Adjusted R^2	P (F 检验) P (F test)
氮肥 Nitrogen fertilizer	线性加平台 Linear plus plateau	y=8.223x+4 946.425 (x≤162.0) y=6 278.551 (x>162.0)	0.580 8	0.008
	一元二次 Unary quadratic	y=4 986.675+9.722 24x−0.016 63x^2	0.503 5	0.008
	平方根 Square root	y=148.653$x^{0.5}$−4.131x+4 934.648	0.502 4	0.000
磷肥 Phosphorus fertilizer	线性加平台 Linear plus plateau	y=18.344x+4 992.067 (x≤64.5) y=6 175.255 (x>64.5)	0.662 9	0.004
	一元二次 Unary quadratic	y=4 986.757 11+25.153 02x−0.117 97x^2	0.650 4	0.002
	平方根 Square root	y=258.720$x^{0.5}$−13.629x+4 977.871	0.610 0	0.000

y 为籽粒产量; x 为肥料施用量。y is grain yield, x is fertilizer rate.

氮磷一元肥料效应模型拟合曲线见图 1a 和图 1b。氮磷线性加平台模型分别在施肥量为 162.0 kg·hm^{-2} 和 64.5 kg·hm^{-2} 时发生转折，即产量不再随着施肥量的增加而增加，而是趋于稳定。氮磷一元二次拟合模型分别在施氮 292.3 kg·hm^{-2} 和施磷 106.6 kg·hm^{-2} 时达最大产量，且该模型有别于线性加平台模型，因为前者在施肥量过多时形成产量降低的模拟趋势，而后者无此模拟趋势。氮磷平方根模型分别在施氮 323.7 kg·hm^{-2} 和施磷 90.1 kg·hm^{-2} 时达最大产量。该模型拟合的曲线类似于线性加平台模型，但前者在施肥量较大时随着施肥量增加，产量增加相对缓慢。氮平方根模型在施肥量较大时产量变化趋于零，而磷的该模型有产量下降的趋势。

在该试验区的肥力条件下，氮磷肥作用形成的施肥量与产量间的关系为:

$$y=4\,472.222+6.202\,5x_1+18.412\,6x_2+0.030\,9x_1x_2-0.016\,1x_1^2-0.127\,8x_2^2 \quad (5)$$

上述拟合方程 R^2 值为 0.705 8，经 F 检验 P 值小于 0.01，冬小麦籽粒产量与氮磷施用量呈极显著相关关系。根据该模型的拟合曲线显示(图 1c)，在氮磷两因素的影响下，产量明显出现一个最高点，该点对应施氮量为 296.5 kg·hm^{-2}、施磷量为 107.9 kg·hm^{-2}。

2.2　最佳施肥量和收益

一元和二元模型冬小麦最高产量拟合结果见表 3，氮的一元二次模型拟合得出的籽粒产量最高，其次是线性加平台和平方根模型，但收益是线性加平台模型>一元二次模型>平方根模型，对应施氮量为平方根模型>一元二次模型>线性加平台模型；磷的一元二次模型拟合得出的籽粒产量最高，其次是平方根模型和线性加平台模型，收益是一元二次模型>线性加平台模型>平方根模型，对应施磷量为一元二次模型>平方根模型>线性加平台模型。对比一元和二元模型，二元模型的最高产量较前两者低 24.4 kg·hm^{-2}、−55.7 kg·hm^{-2}，但考虑到经济收益，最高产量并非对应着最大收益，故不能单纯通过最高产量来选择模型，也要考虑最后的收益，即需要用边际效应来比较各模型。

表 4 显示，氮的线性加平台模型拟合出的收益最高，其次是一元二次模型和平方根模型，最佳经济施氮量为一元二次模型>平方根模型>线性加平台模型。线性加平台模型收益仅比一元二次模型高 14 元·hm^{-2}，但其最佳经济施氮量低 92.4 kg·hm^{-2}。若单以收益为目的，线性加平台模型和一元二次模型都可作为氮肥模型的选择。本试验中线性加平台模型的收益最高 7 462.3 元·hm^{-2}，最佳经济施氮量为 162.0 kg·hm^{-2}。磷的一元二次模型拟合得出的收益最高，其次是平方根模型和线性加平台模型，对应施磷量为一元二次模型>平方根模型>线性加平台模型。尽管线性加平台模型的拟合度较好，但综合经济因素，一元二次模型的收益最高(7 357.7 元·hm^{-2})，最佳经济施磷量为 98.6 kg·hm^{-2}。故在一元模型中，

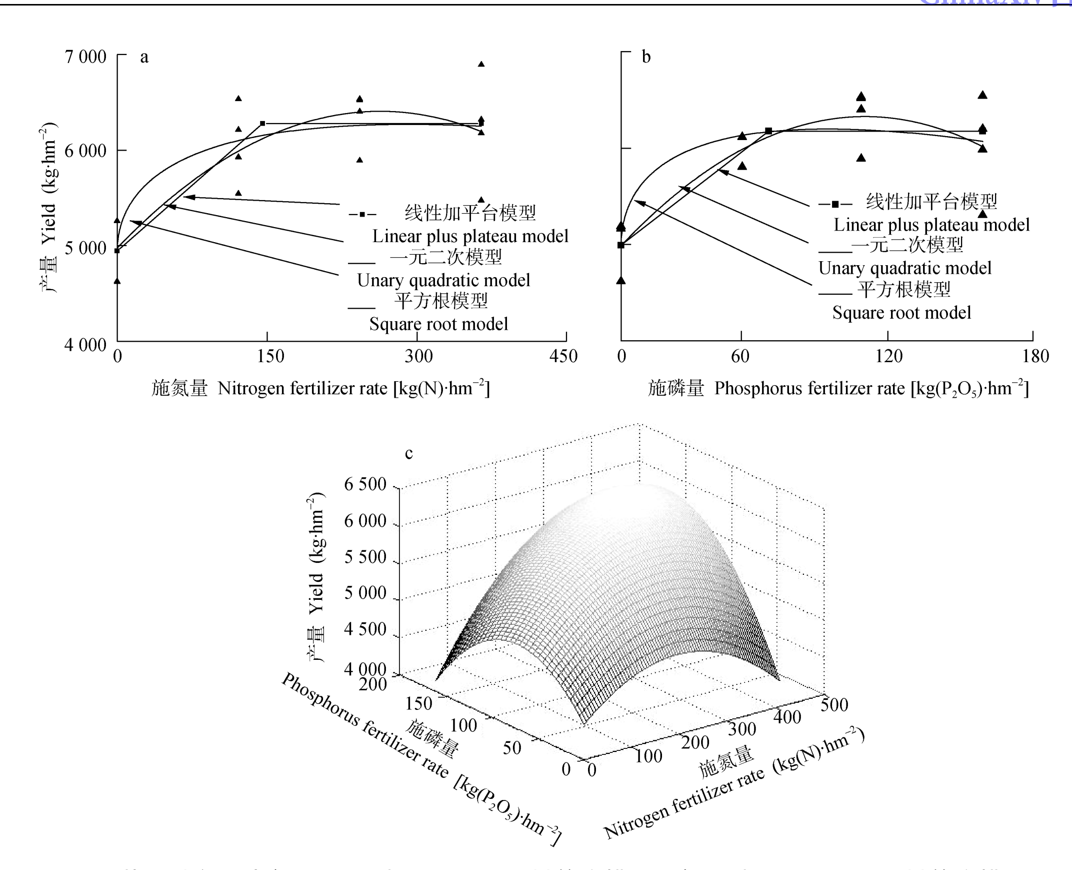


图 1 盐碱地冬小麦氮肥(a)和磷肥(b)一元肥料效应模型及氮、磷肥二元二次肥料效应模型(c)

Fig. 1 Unary models of nitrogen (a) and phosphorus (b) fertilizers effects and binary quadratic model of nitrogen and phosphorus (c) fertilizer effects on winter wheat in saline soil

表 3 盐碱地冬小麦氮磷肥料效应模型最高产量拟合结果

Table 3 Maximum yield predicted by each model of nitrogen and phosphorus fertilizer effects of winter wheat in saline soil

模型 Model	肥料 Fertilizer	肥料效应模型 Fertilizer effect model	施氮量 Nitrogen fertilizer rate [kg(N)·hm^{-2}]	施磷量 Phosphorus fertilizer rate [kg(P$_2$O$_5$)·hm^{-2}]	籽粒最高产量 Maximum yield (kg·hm^{-2})	收益 Profit (¥·hm^{-2})
一元 Unary	氮肥 Nitrogen	线性加平台 Linear plus plateau	162.0	105.0	−105.0	89.0
		一元二次 Unary quadratic	292.3	105.0	24.4	44.7
		平方根 Square root	323.7	105.0	−111.3	−177.9
	磷肥 Phosphorus	线性加平台 Linear plus plateau	270.0	64.5	−207.7	−117.1
		一元二次 Unary quadratic	270.0	106.6	−55.7	−25.2
		平方根 Square root	270.0	90.1	−177.6	−140.3
二元 Binary		二元二次 Binary quadratic	296.5	108.0	0.0	0.0

各模型以二元二次模型籽粒产量(6 383.3 kg·hm^{-2})和收益(7 373.3 元·hm^{-2})为基准。The benefit (6 383.3 kg·hm^{-2}) and grain yield (7 373.3 ¥·hm^{-2}) of binary quadratic model is the standard for each model.

表 4 盐碱地冬小麦氮磷肥料效应模型最佳经济施肥量拟合结果

Table 4 Optimal economic rates of nitrogen and phosphorus fertilizers by each model of fertilizer effects on winter wheat in saline soil

模型 Model	肥料 Fertilizer	肥料效应模型 Fertilizer effect model	最佳经济施氮量 Optimal economic nitrogen fertilizer rate [kg(N)·hm^{-2}]	最佳经济施磷量 Optimal economic phosphorus fertilizer rate [kg(P$_2$O$_5$)·hm^{-2}]	籽粒产量 Yield (kg·hm^{-2})	收益 Profit (¥·hm^{-2})
一元 Unary	氮肥 Nitrogen	线性加平台 Linear plus plateau	162.0	105.0	−59.7	29.8
		一元二次 Unary quadratic	254.4	105.0	45.8	15.8
		平方根 Square root	190.1	105.0	−139.0	−116.0
	磷肥 Phosphorus	线性加平台 Linear plus plateau	270.0	64.5	−162.4	−176.3
		一元二次 Unary quadratic	270.0	98.6	−18.0	−74.8
		平方根 Square root	270.0	69.5	−150.5	−173.1
二元 Binary		二元二次 Binary quadratic	244.1	94.2	0.0	0.0

各模型以二元二次模型收益(6 337.9 kg·hm^{-2})和籽粒产量(7 432.4 ¥·hm^{-2})为基准。The benefit (6 337.9 kg·hm^{-2}) and grain yield (7 432.4 ¥·hm^{-2}) of binary quadratic model is the standard for each model.

氮肥适合选用线性加平台模型和一元二次模型拟合，而磷肥适合一元二次模型拟合。

对比一元和二元的二次模型，二元模型的最高收益较前两者低 15.8 元·hm^{-2}、−74.8 元·hm^{-2}，而最佳经济施氮量低 10.3 kg·hm^{-2}、最佳施磷量低 4.4 kg·hm^{-2}。由此可知，一元二次模型和二元二次模型拟合计算出的最高收益和最佳施肥量差距很小，而后者将氮磷作为自变量引入同一方程，能考虑到氮磷之间的交互作用。

2.3　肥料农学利用率

肥料农学利用率是肥料利用效率的一个重要指标，其计算公式为[29]:

氮肥农学利用率=(施氮区籽粒产量−无氮区籽粒产量)/施氮量　　(6)

图 2 显示随着施肥量的增加，农学利用率逐渐降低，两者之间存在线性关系，相关系数均达显著水平。其中氮磷处理的 1、3 水平差异显著，而 2 水平与其他水平差异不显著。施氮处理的 1~3 水平的农学利用率为 8.2 kg(籽粒)·kg^{-1}(N)、5.2 kg(籽粒)·kg^{-1}(N)、3.1 kg(籽粒)·kg^{-1}(N), 1 水平的氮肥农学利用率是 3 水平的 2.6 倍。施磷处理的 1~3 水平的农学利用率为 18.3 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5)、12.8 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5)、6.5 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5), 1 水平的磷肥农学利用率是 3 水平的 2.8 倍。总体表现出氮肥农学利用率低于磷肥农学利用率。结果表明，氮磷施用量增加，肥料农学利用率降低，但磷肥利用率高于氮肥。

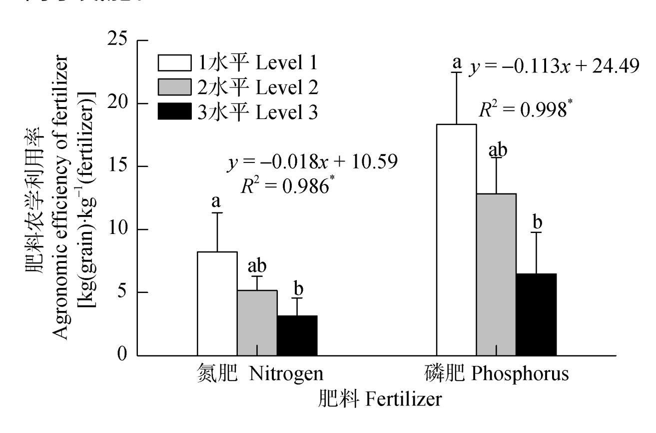


图 2　盐碱地冬小麦肥料农业利用率

Fig. 2　Agronomic efficiencies of nitrogen fertilizer and phosphorus fertilizer of winter wheat in saline soil

同簇不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。Different lowercase letters in the same cluster mean significant difference at the level of 5%.

根据肥料用量与利用率之间的线性关系，可得出不同模型最佳肥料施用量的农学利用率。氮磷线性加平台模型、一元二次模型、平方根模型推荐的最佳经济施氮量对应的利用率为 7.7 kg(籽粒)·kg^{-1}(N)、6.0 kg(籽粒)·kg^{-1}(N)、7.2 kg(籽粒)·kg^{-1}(N)和 17.2 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5)、13.3 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5)、16.63 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5); 氮磷二元二次模型荐的最佳经济施氮量对应的利用率为 6.2 kg(籽粒)·kg^{-1}(N)、13.8 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5)。结果表明，氮磷的线性加平台模型肥料利用率最高，一元二次模型和二元二次模型肥料利用率几乎一致。

3　讨论与结论

评价肥料效应模型，需从统计检验的拟合性和推荐施肥量的节省程度上考虑[30]。拟合模型 R^2 越大，其拟合程度越好，在模拟冬小麦氮肥一元模型时，曾长立等[30]发现 R^2 值大小为线性加平台模型>一元二次模型>平方根模型; 王新民等[26]的研究也显示线性加平台模型>一元二次模型; 孟泽凤等[31]在模拟冬小麦氮磷肥模型时, R^2 值显示二元二次模型>一元二次模型，且氮肥>磷肥(一元二次模型); Cerrato 等[32]在模拟玉米(*Zea mays*)氮肥一元模型时，发现线性加平台模型>一元二次模型>平方根模型。本研究中，在盐胁迫下冬小麦的氮磷拟合模型 R^2 仍显示二元二次模型>线性加平台模型>一元二次模型>平方根模型; 但在一元模型中，磷肥>氮肥。试验表明在盐分胁迫下各模型的拟合效果不受盐分影响，但是盐渍土磷肥的拟合效果优于氮肥。因此，可推断在高盐分地区模型的拟合效果依然表现为二元二次模型和一元线性加平台模型最优。随着施肥量的增加，氮肥平方根模型对应的产量增加越缓慢，但是受盐分胁迫作用，磷的该模型有产量下降的趋势。这可能是由于在该试验处理中氮的用量还达不到产量下降的程度，但也不排除其他原因导致的这种现象，需要进一步做试验进行证实。

在盐分较低地区，曾长立等[30]发现，冬小麦氮肥线性加平台模型最优，其最佳施氮量为119.6 kg·hm^{-2}，而本试验中布置在盐渍土上线性加平台模型对应的最佳施肥量为162.0 kg·hm^{-2}，这符合盐渍土地区需要增施氮肥减缓盐胁迫的土壤管理措施[33]。在全盐 1.2 g·kg^{-1}的盐渍土地区，陈修斌等[34]对胡萝卜(*Daucus carota*)的氮磷肥料一元二次模型进行模拟并通过试验验证了该模型得到的收益最高。由于不同作物适宜的肥料模型有所差异[21]，本试验区全盐 1.4 g·kg^{-1}，冬小麦的氮肥线性加平台模型和一元二次模型收益较高，磷肥的一元二次模型收益最高。王立艳等[11]运用二次多项式模型拟合出冬小麦-玉

米在施氮量为763 kg·hm^{-2}时达到最高产量，但未考虑收益。本试验中最高产量对应的并非最高收益，因此运用边际效应对各模型的最高收益进行对比分析，得出氮肥适合选用线性加平台型和一元二次模型拟合，而磷肥适合用一元二次模型进行拟合。由于一元二次和二元二次模型拟合出的最高收益和最佳施肥量差距很小，而后者将氮磷作为自变量引入同一方程，考虑了氮磷间的交互作用，因此盐渍土地区也适合选用二元二次模型，这符合毛达如等[35]提出的二次式模型最适合模拟肥料效应方程。

盐分过高抑制土壤硝化作用，影响氮肥的利用[36]。本研究区高氮磷量的施入明显降低了肥料农学利用率，且氮磷各模型得出的最佳施肥量的肥料利用率均介于2、3水平，虽然推荐的最佳肥料施用量未达到最大肥料利用率，但其在保证肥料利用率较高的情况下得到的收益最高。在低盐(全盐0.56 g·kg^{-1})地区，线性加平台模型最佳施肥量的氮肥利用率是一元二次模型的1.3倍[30]。在本试验中，氮磷的线性加平台模型肥料利用率分别是一元二次模型的1.28倍和1.29倍。因此可推断氮磷肥料各模型间肥料利用率的关系不受盐分的影响。

不同学者研究得出的最适模型不同。王兴仁等[21]认为黄淮海区域宜采用线性加平台模型，关宁[27]认为基础肥力不高的土壤可采用二次模型，而基础肥力较高的土壤采用平方根模型。综合上述，黄河三角洲盐渍土区域受盐分胁迫的影响，肥料投入相对高于普通农田的投入，在保证拟合度较高的条件下，氮磷二元二次模型可作为该地区地力条件下的合适选择。

黄河三角洲地区冬小麦可用线性加平台模型、一元二次模型、平方根模型和二元二次模型描述肥料用量与作物产量的回归关系。综合模型的拟合度、最佳经济施肥量、经济收益和肥料农学利用率，探究单一肥料时可选择一元二次模型；而在研究氮磷双因素肥料时，二元二次模型可作为肥料效应模型的最佳选择。黄河三角洲地区一般是氮磷肥进行配施，因此二元二次模型是更优的施肥模型。在土壤轻度盐渍化地区，二元二次模型对应的最佳经济施氮量为244.1 kg·hm^{-2}，最佳经济施磷量为94.2 kg·hm^{-2}，即氮磷肥配比为2.6∶1，经济收益为7 432.4 元·hm^{-2}，氮肥农学利用率为6.2 kg(籽粒)·kg^{-1}(N)，磷肥农学利用率为13.8 kg(籽粒)·kg^{-1}(P_2O_5)。根据每年的粮食价格和肥料价格变动，可利用模型推算该地区更贴合实际的最佳经济施肥量，以利于科学指导施肥。

参考文献 References

[1] 王遵亲，祝寿泉，俞仁培，等. 中国盐渍土[M]. 北京：科学出版社, 1993: 1–3
Wang Z Q, Zhu S Q, Yu R P, et al. Salt-affected Soils of China[M]. Beijing: Science Press, 1993: 1–3

[2] 郭勃. 基于RS和GIS的黄河三角洲盐碱地分级与治理研究[D]. 济南：山东师范大学, 2015: 9–10
Guo B. The research on saline-alksli soil grading and governance of the Yellow River Delta based on the RS and GIS[D]. Ji’nan: Shandong Normal University, 2015: 9–10

[3] 王金荣. 东营市土壤[R]. 东营：东营市土壤肥料工作站, 1988: 3–5
Wang J R. Dongying Soil[R]. Dongying: Dongying Soil and Fertilizer Station, 1988: 3–5

[4] 李百红，赵庚星，董超，等. 基于遥感和GIS的黄河三角洲盐化土地动态及其驱动力分析[J]. 自然资源学报，2011, 26(2): 310–318
Li B H, Zhao G X, Dong C, et al. Dynamic and driving force analysis of salinized land in the Yellow River Delta based on RS and GIS[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(2): 310–318

[5] 吴志芬，赵善伦，张雪雷. 黄河三角洲盐生植被与土壤盐分的相关性研究[J]. 植物生态学报, 1994, 18(2): 184–193
Wu Z F, Zhao S L, Zhang X L. Studies on interrelation between salt vegetation and soil salinity in the Yellow River Delta[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 1994, 18(2): 184–193

[6] 王海梅，李政海，宋国宝，等. 黄河三角洲植被分布、土地利用类型与土壤理化性状关系的初步研究[J]. 内蒙古大学学报：自然科学版, 2006, 37(1): 69–75
Wang H M, Li Z H, Song G B, et al. The correlation among vegetation distribution, land use type and soil character in Yellow River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis NeiMongol, 2006, 37(1): 69–75

[7] 张建峰，张旭东，周金星，等. 世界盐碱地资源及其改良利用的基本措施[J]. 水土保持研究, 2005, 12(6): 28–30
Zhang J F, Zhang X D, Zhou J X, et al. World resources of saline soil and main amelioration measures[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(6): 28–30

[8] 周和平，张立新，禹锋，等. 我国盐碱地改良技术综述及展望[J]. 现代农业科技, 2007, (11): 159–161
Zhou H P, Zhang L X, Yu F, et al. Review and prospect of saline land improvement in China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2007, (11): 159–161

[9] 崔盛本，钱晓晴，王祝余. 淮北盐渍低产稻麦田轮种绿肥的综合效应[J]. 土壤通报, 1995, 26(2): 78–81
Cui S B, Qian X Q, Wang Z Y. The comprehensive benefits of green manure applied in the low yield farmland of rice-wheat rotation in saline soil of Huaibei[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1995, 26(2): 78–81

[10] 陈晓东，赵斌，顾江涛，等. 氮肥运筹对江淮麦区饲料大麦籽粒产量与品质的影响[J]. 华北农学报，2014，29(增刊): 280–283
Chen X D, Zhao B, Gu J T, et al. Effects of nitrogen application rates and ratio on grain yield and quality of feed barley in Jianghuai wheat region[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica,

2014, 29(S1): 280–283

[11] 王立艳，肖辉，程文娟，等．滨海盐碱地不同培肥方式对作物产量及土壤肥力的影响[J]．华北农学报，2016，31(5): 222–227
Wang L Y, Xiao H, Cheng W J, et al. Effects of different fertilization mode on crops yield and soil fertility in Coastal Saline soil[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2016, 31(5): 222–227

[12] 李建国，濮励杰，朱明，等．土壤盐渍化研究现状及未来研究热点[J]．地理学报, 2012, 67(9): 1233–1245
Li J G, Pu L J, Zhu M, et al. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(9): 1233–1245

[13] 李宏广，何文寿，段晓红，等．宁夏前进农场碱化土壤改良及水稻合理施肥技术研究[J]．西北农业学报，2009，18(5): 217–222
Li H G, He W T, Duan X H, et al. Techniques of alkalized soil improvement and rational fertilization for rice on Qianjin farm in Ningxia Province[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2009, 18(5): 217–222

[14] 邓力群，刘兆普，程爱武，等．不同盐分滨海盐土上油葵(G101-B)的氮磷肥效应研究[J]．中国油料作物学报，2002，24(4): 61–64
Deng L Q, Liu Z P, Cheng A W, et al. Influence of N and P fertilizers on sunflower grown in different saline soil on coast[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2002, 24(4): 61–64

[15] 曾文治，徐驰，黄介生，等．土壤盐分与施氮量交互作用对葵花生长的影响[J]．农业工程学报, 2014, 30(3): 86–94
Zeng W Z, Xu C, Huang J S, et al. Interactive effect of salinity and nitrogen application on sunflower growth[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 86–94

[16] 东营市统计局．东营统计年鉴——农林牧渔业[DB/OL]. [2015-05-12]. http://www.dystjj.gov.cn/dytj/Columns/19374178653.shtml
Dongying Statistics Department. Dongying Statistical Yearbook — Agriculture, Forestry, Animal, Husbandry and Fishery[DB/OL]. [2015-05-12]. http://www.dystjj.gov.cn/dytj/Columns/19374178653. shtml

[17] 王艳群，彭正萍，薛世川，等．过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]．农业环境科学学报, 2005, 24(增刊): 81–84
Wang Y Q, Peng Z P, Xue S C, et al. Effect of excessive fertilization on soil ecological environment in the facility farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(S1): 81–84

[18] 杨青林，桑利民，孙吉茹，等．我国肥料利用现状及提高化肥利用率的方法[J]．山西农业科学, 2011, 39(7): 690–692
Yang Q L, Sang L M, Sun J R, et al. Current situation of fertilizer use in china and the method to improve chemical fertilizer utilization efficiency[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2011, 39(7): 690–692

[19] 郭淑霞，龚元石．不同盐分和氮肥水平对菠菜水分及氮素利用效率的影响[J]．土壤通报, 2011, 42(4): 906–910
Guo S X, Gong Y S. Effect of different salinity and nitrogen on water and nitrogen use efficiency of spinach[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(4): 906–910

[20] 章明清，李娟，孔庆波，等．作物肥料效应函数模型研究进展与展望[J]．土壤学报, 2016, 53(6): 1343–1356
Zhang M Q, Li J, Kong Q B, et al. Progress and prospect of the study on crop-response-to-fertilization function model[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(6): 1343–1356

[21] 王兴仁，陈新平，张福锁，等．施肥模型在我国推荐施肥中的应用[J]．植物营养与肥料学报, 1998, 4(1): 67–74
Wang X R, Chen X P, Zhang F S, et al. Application of fertilization model for fertilizer recommendation in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1998, 4(1): 67–74

[22] 王圣瑞，陈新平，高祥照，等．“3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]．植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409–413
Wang S R, Chen X P, Gao X Z, et al. Study on simulation of “3414” fertilizer experiments[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 409–413

[23] 孙义祥，郭跃升，于舜章，等．应用“3414”试验建立冬小麦测土配方施肥指标体系[J]．植物营养与肥料学报，2009，15(1): 197–203
Sun Y X, Guo Y S, Yu S Z, et al. Establishing phosphorus and potassium fertilization recommendation index based on the “3414” field experiments[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 197–203

[24] 张福锁．测土配方施肥技术[M]．北京：中国农业大学出版社, 2011: 86–90
Zhang F S. Soil Testing and Fertilization Recommendation[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 86–90

[25] 王素华，孙彦铭，冯自军，等．唐山市冬小麦“3414”试验肥料效应研究[J]．河北农业科学, 2009, 13(9): 1–2
Wang S H, Sun Y M, Feng Z J, et al. Fertilizer effect of “3414” experiment on winter wheat in Tangshan[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2009, 13(9): 1–2

[26] 王新民，介晓磊，陈士林，等．冬小麦与夏玉米轮作肥料效应模型的校验[J]．安徽农业科学, 2008, 36(10): 4181–4184
Wang X M, Jie X L, Chen S L, et al. Verification of fertilization model and recommended fertilization in the crop rotation of winter wheat and summer maize[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(10): 4181–4184

[27] 关宁．多元肥料效应函数模型研究[D]．长春：吉林农业大学, 2012: 2–5
Guan N. Function model of multi-fertilization effect[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012: 2–5

[28] 申建波，毛达如．植物营养研究方法[M]. 3 版．北京：中国农业大学出版社, 2011: 86–90
Shen J B, Mao D R. Research Methods of Plant Nutrition[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2011: 86–90

[29] Shukla A K, Ladha J K, Singh V K, et al. Calibrating the leaf color chart for nitrogen management in different genotypes of rice and wheat in a systems perspective[J]. Agronomy Journal, 2004, 96(6): 1606–1621

[30] 曾长立，王兴仁，陈新平，等．冬小麦氮肥肥料效应模型的选择及其对推荐施氮效果的影响[J]．江汉大学学报，2000，17(3): 8–12
Zeng C L, Wang X R, Chen X P, et al. Study on the select of

nitrogen fertilization models for winter wheat and the effects of it on result of fertilizing nitrogen[J]. Journal of Jianghan University, 2000, 17(3): 8–12

[31] 孟泽凤, 李放, 孟霞, 等. 应用“3414”设计对潮土区小麦氮、磷、钾最佳施用量的研究[J]. 山东农业科学, 2010, (10): 71–74
Meng Z F, Li F, Meng X, et al. Study on optimal supplying rates of N, P and K for winter wheat in fluvo-aquic soil by “3414” experiment[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2010, (10): 71–74

[32] Cerrato M E, Blackmer A M. Comparison of models for describing; Corn yield response to nitrogen fertilizer[J]. Agronomy Journal, 1990, 82(1): 138–143

[33] 武荣, 李援农. 不同氮肥条件下盐分处理对小麦生长的影响分析[J]. 节水灌溉, 2013, (5): 8–10
Wu R, Li Y N. Effect of salinity and nitrogen interaction on the growth of wheat[J]. Water Saving Irrigation, 2013, (5): 8–10

[34] 陈修斌, 张红菊, 赵怀勇, 等. 河西走廊加工型胡萝卜 N、P、K 肥配施数学模型构建与优化方案研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2007, 38(4): 540–543
Chen X B, Zhang H J, Zhao H Y, et al. Mathematical model and optimization scheme for river west corridor processing type carrot N, P, K fertilizer formulation[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(4): 540–543

[35] 毛达如, 张承东. 推荐施肥技术中施肥模型与试验设计的研究[J]. 土壤通报, 1991, 22(5): 216–218
Mao D R, Zhang C D. Study on fertilization model and experimental design in recommended fertilization[J]. Chinese Journal of Soil Science, 1991, 22(5): 216–218

[36] 闵伟, 侯振安, 梁永超, 等. 土壤盐度和施氮量对灰漠土尿素 N 转化的影响[J]. 土壤通报, 2012, 43(6): 1372–1379
Min W, Hou Z A, Liang Y C, et al. Effects of soil salinity level and nitrogen rate on urea-N transformation in grey desert soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(6): 1372–1379